

# Методи та засоби неруйнівного контролю і технічної діагностики

УДК 622.24.05-004.4

## АЛГОРИТМ ОБРОБЛЕННЯ СИГНАЛІВ ПІД ЧАС АНАЛІЗУ ПОШИРЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ

*І.З. Лютак, І.С. Кісіль, А.А. Мандра, З.П. Лютак**ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 46077,  
e-mail: public@nimg.edu.ua*

*Розроблено алгоритм оброблення сигналів ультразвукових поверхневих хвиль, що базується на теорії вейвлет перетворення. Представлено підхід до зменшення завад в сигналі. Описано спосіб виокремлення окремих інформативних частин із загального сигналу за результатами аналізу частотної та часової областей. Результати наведені у вигляді графіків.*

Ключові слова: поверхнева ультразвукова хвиля, вейвлет-аналіз

*Разработан алгоритм обработки сигналов ультразвуковых поверхностных волн, основанный на теории вейвлет преобразования. Представлен подход к уменьшению помех в сигнале. Показан способ выделения отдельных информативных частей из общего сигнала по результатам анализа частотной и временной областей. Результаты приведены в виде графиков.*

Ключевые слова: поверхностная ультразвуковая волна, вейвлет-анализ

*The algorithm of signal processing of ultrasonic surface waves, based on the theory of wavelet transform is presented. It is presented approach of reducing noise in the signal. The method of selection of informative individual parts from the total signal in frequency and time domains is presented. Results are given in graphs.*

Keywords: surface ultrasonic waves, wavelets

### Вступ

Дослідження параметрів ультразвукових хвиль дає можливість більш точно здійснити оцінку окремих властивостей досліджуваного об'єкта. Це важливо у випадку застосування ультразвукового методу при неруйнівному контролі відповідальних металоконструкцій, де необхідно виокремити частину нестационарного сигналу на фоні завад та інших сигналів. Підхід, за даними якого можна точно визначити частину нестационарного інформаційного сигналу, – вейвлет-перетворення.

Сучасний метод визначення швидкості поширення ультразвуку був запропонований науковцями Куо та Хіте [1]. Згаданий ними метод був відтак удосконалений в праці [2], де визначалась швидкість ультразвуку та товщина пластини за вимірюванням шляху та часу поширення ультразвуку. В їх методі імпульси ультразвукової хвилі проходили крізь одну стінку труби, товщина якої є визначеною. Недолік запропонованого методу полягає в наявності

похибки від неточності визначення шляху проходження ультразвукової хвилі.

Назва вейвлет із сучасним змістом вперше було використано Гроссманом і Морлетом у першій половині вісімдесятих років минулого століття [3, 7]. Базуючись на своїй інтуїції вони визначили вейвлети в контексті теорії квантової фізики. Працюючи над теорією цифрової обробки сигналів, С. Маллат вніс новий підхід до теорії вейвлетів, з'єднавши термін фільтрів із дзеркальною симетрією, пірамідальний алгоритм і ортогональний базис вейвлетів [4]. Й. Меєр сконструював неперервно диференційовані вейвлети, які не мають компактності (де скінченна область не дорівнює нулю) [5]. І Добеши додала до роботи Хаара ряд різних сімей вейвлетів із ортогональним базисом [6].

Завданням даного дослідження є розроблення алгоритму обробки сигналів шляхом аналізу поширення поверхневих ультразвукових хвиль в металевому об'єкті, що дасть можливість виявити інформативну частину із повного прийнятого сигналу.

### Алгоритм аналізу ультразвукового сигналу

Ультразвуковий сигнал, що надходить на приймаючий первинний перетворювач, має складну форму. Спочатку при переході крізь шари демпфера, границю розділу демпфера та досліджуваного об'єкта згенерований імпульс спотворюється, а відтак внаслідок впливу теплових процесів, явища демпфування акустичної хвилі матеріалом досліджуваного об'єкта сигнал розсіюється. Далі на сигнал накладаються відбиті ультразвукові коливання від границі досліджуваного об'єкта. Аналіз такого сигналу традиційними методами (як дискретне перетворення Фур'є) чи з використанням різних функцій вікон є нерезультативним. Тоді найефективнішим підходом виявилось використання вейвлет-перетворення. Вейвлети – це математичні функції, що відповідають заданим критеріям, наприклад, таким, як рівність нулю математичного очікування. Для аналізу сигналів використовується набір розтягів вздовж осі ординат та зсувів вздовж осі абсцис  $\psi_{a,b}(x)$  вибраної функції материнського вейвлета  $\psi(x)$  [7]:

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right), \quad a > 0, \quad (1)$$

де:  $a$  – коефіцієнт масштабування;  $b$  – коефіцієнт зсуву,  $x$  – вибірка точок оцифрованого часового сигналу.

Коефіцієнти масштабування та зсуву вибираються таким чином, щоб результуючий вейвлет формував ортогональний набір значень, тобто внутрішній добуток кожної функції вейвлета  $\psi_{a,b}$  дорівнював нулю.

Частота сигналу  $\omega$ , що аналізується, є обернено пропорційною до вейвлет коефіцієнта масштабування [7]:

$$\omega = 1/a. \quad (2)$$

Пряме вейвлет-перетворення розкладає сигнал  $f(t)$  в часі  $t$  на складові частини базових вейвлет функцій, тобто визначає внесок кожного масштабування та зсуву на первинний сигнал. Значення таких перетворень є вейвлет коефіцієнтами  $c_{a,b}$  [7]:

$$c_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi_{a,b}\left(\frac{x-b}{a}\right) dx. \quad (3)$$

Зворотнє вейвлет-перетворення реконструює досліджуваний сигнал:

$$f(t) = \sum_{a,b} c_{a,b} \psi_{a,b}\left(\frac{x-b}{a}\right). \quad (4)$$

Загальною властивістю вейвлет-перетворення є можливість багатороздільного аналізу – аналізування в різних масштабах та різних роздільних значеннях досліджуваного сигналу. За допомогою багатороздільного аналізу досягається велика роздільна здатність сигналу в часі на високих частотах та висока роздільна здатність за частотою на низьких частотах.

Для дискретних сигналів вейвлет-перетворення матиме такий вигляд [7]:

$$\psi_{l,k}(x) = \frac{1}{\sqrt{a_0^l}} \psi\left(\frac{x - kb_0 a_0^l}{a_0^l}\right), \quad (5)$$

де:  $l, k$  – цілі числа;  $a_0$  – коефіцієнт масштабування фіксованої величини, що береться рівним 2 так, щоб поділ за частотною шкалою був на два;  $b_0$  – коефіцієнт зсуву береться рівним одиниці для однорідності часової шкали.

Рівняння (5) застосовується таким чином. Для кожної точки на площині час-частота визначається величина вейвлет коефіцієнта  $c_{a,b}$  згідно з (3) [7]. Створюється сітка для дискретизації сигналу. Для цього коефіцієнт масштабування дискретизується шляхом вибору деякого цілого значення на логарифмічній шкалі  $\log a$ . Основа логарифму визначається, як правило, рівною двом. При основі логарифма два, масштаби для яких визначається масштабування є 2, 4, 8, 16 і т. д. Наступним кроком є однорідна дискретизація часової шкали з кроком, що залежить від дискретизації осі масштабу. У випадку, коли основа логарифму дорівнює двом, дискретні значення коефіцієнту масштабування змінюються на коефіцієнт 2, кількість точок на часовій осі зменшується на коефіцієнт 2 на наступній шкалі. Наприклад, при дискретизації сигналу 32-ма точками на часовій шкалі при масштабі  $a = 2$ , то за наступного масштабу  $a = 4$  кількість точок часової шкали зменшиться у два рази і дорівнюватиме 16, причому ці точки рівномірно описуватимуть весь діапазон часу існування сигналу.

Один крок в процесі аналізу складається із відділення апроксимації та деталей сигналу, розділяючи один сигнал на два. Два сигнали мають таку ж довжину як початковий, збільшуючи кількість даних. Компресія даних полягає у відкидуванні кожної другої частини сигналу так, що два отримані сигнали мають разом таку ж кількість даних, що і початковий сигнал. Апроксимований сигнал є вхідним для наступного кроку аналізу. Трансформація сигналу має наслідком збільшення часових відрізків та покращення частотної роздільної здатності вихідних сигналів. Компресія зменшує у двічі роздільну здатність в часовій шкалі, оскільки лише половина точок вибірки тепер описують весь сигнал. Декомпозиція подвоює роздільну здатність в частотній осі через те, що частотний шар тепер включає тільки половину попереднього частотного шару. Така процедура називається смуговим кодуванням в обробці сигналів. На кожному рівні фільтрування і компресія буде мати результат в поділі навпіл частотного шару та збільшенні роздільної здатності в частотній області та зменшенні у двічі точок вибірки подвоєнні тривалості часового кроку та зменшенні в два рази часової роздільної здатності. В кінцевому кроці при довжині сигналу в  $2^m$  точок вибірки найбільший крок декомпозиції вейвлет аналізу буде  $m$  і на виході із апроксимації буде сигнал одиничної довжини. Вейвлет сигнал отримується шляхом об'єднання всіх коефіцієнтів, починаючи з останнього рівня декомпозиції, що формує вектор  $\{a_1, b_1, \dots, b_2, b_1\}$ .

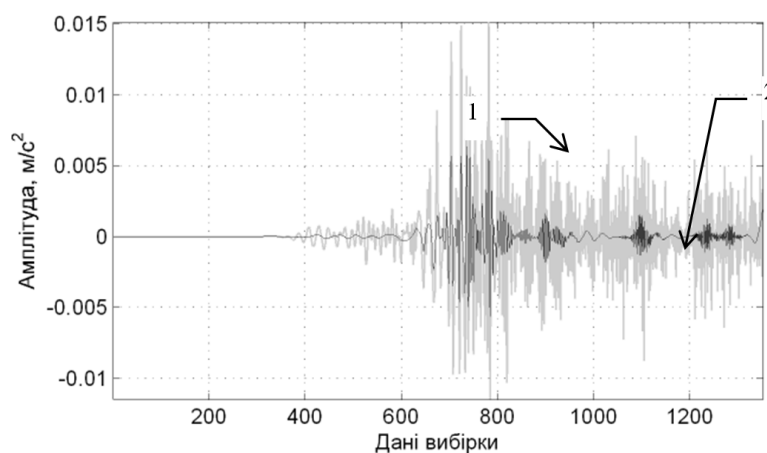


Рисунок 1 – Вхідний сигнал ультразвукової хвилі 1 та сигнал на виході алгоритму очищення від завад 2

Загальна кількість вейвлет коефіцієнтів дорівнює довжині початкового сигналу.

Розглянемо енергію сигналу. Повна енергія  $E$  сигналу  $x(t)$  визначається інтегрованим квадратом амплітуди [9]:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \|x(t)\|^2. \quad (6)$$

Для (6) необхідно, щоб сигнал мав скінченну величину енергії. Відносна енергія сигналу, що зосереджена в масштабі  $a$  та місцеположенні  $b$ , обчислюється функцією двовимірного вейвлета [9]:

$$E(a, b) = |T(a, b)|^2, \quad (7)$$

$$T(a, b) = w(a) \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt,$$

де  $w(a)$  – вагова функція, зірка означає комплексно спряжене число.

Графік  $E(a)$  називається скалограмою. Повна енергія сигналу може бути обчислена в області  $a$  та  $b$  із скалограми [9]:

$$E = \frac{1}{C_g} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |T(a, b)|^2 \frac{da}{a^2} db, \quad (8)$$

де  $C_g$  – константа.

Відносний внесок до загальної енергії сигналу на визначеному значенні коефіцієнта  $a$  обчислюється розподілом енергії, залежним від масштабу [9]:

$$E(a) = \frac{1}{C_g} \int_{-\infty}^{\infty} |T(a, b)|^2 db. \quad (9)$$

Для конвертування спектральної енергії вейвлета, що залежить від масштабу до спектральної енергії вейвлета, що залежить від частоти для порівняння із енергією спектра Фур'є, необхідно здійснити перехід до характеристичної частоти вейвлета.

### Аналіз ультразвукового сигналу

Поширення ультразвукової хвилі у сталій пластині отримано як величини прискорень

у вузлах скінченних елементів. Моделювання поширення ультразвукової хвилі в пластині проводилось для зміненого за фізико-механічними параметрами поверхневого шару. Товщина поверхні пластини із зміненими фізико-механічними параметрами дорівнювала 1,0 мм.

Отриманий сигнал приведений на рис. 1. До ультразвукового сигналу застосовано підхід зняття завад на основі вейвлета Добеши 4, (рис. 2).

Сигнал складається із 1352 точок вибірки, що розподілені рівномірно на часовій шкалі. Це уможливорює багаторівневий аналіз сигналу. Графіки коефіцієнтів ультразвукового сигналу зображені на рис. 4. Як бачимо амплітуда коефіцієнтів найбільша на низьких частотах всередині часової шкали, проте досить великі значення коефіцієнтів існують на більш високих частотах в кінці часової шкали. Здійснити детальний аналіз сигналу перешкоджає значна кількість завад. Графік коефіцієнтів вейвлет аналізу без завад зображений на рис. 4.

На основі підходу Койфмана та Вікерхаузера, коли застосовується техніка адаптивних фільтрів, здійснено побудову найбільш оптимального дерева пакетної декомпозиції ультразвукового сигналу (рис. 5) [8].

Для пакетного аналізу найбільшими коефіцієнтами є ряд пакетів, зображених на рис. 6.

Як можна побачити із пакетної обробки ультразвукового сигналу, на третьому рівні зберігається інформація про значну енергію сигналу, що може бути результатом поширення збудженої ультразвукової хвилі, а не додатковими відбиттями чи розширенням пучка променів у тілі об'єкта контролю.

На четвертому рівні обробки сигналу зберігається більш високочастотна складова, що існує всередині та наприкінці часової шкали. Як можна побачити із амплітуди сигналу, вейвлет коефіцієнти в кінці часової шкали мають набагато більшу амплітуду, ніж коефіцієнти, що описують сигнал, починаючи із середини часової шкали. Це свідчить про зосередження енергії ультразвукового сигналу показаного пакетом 4,10. Причини зосередження ультразвукового сигналу у хвилі, що поширюється із

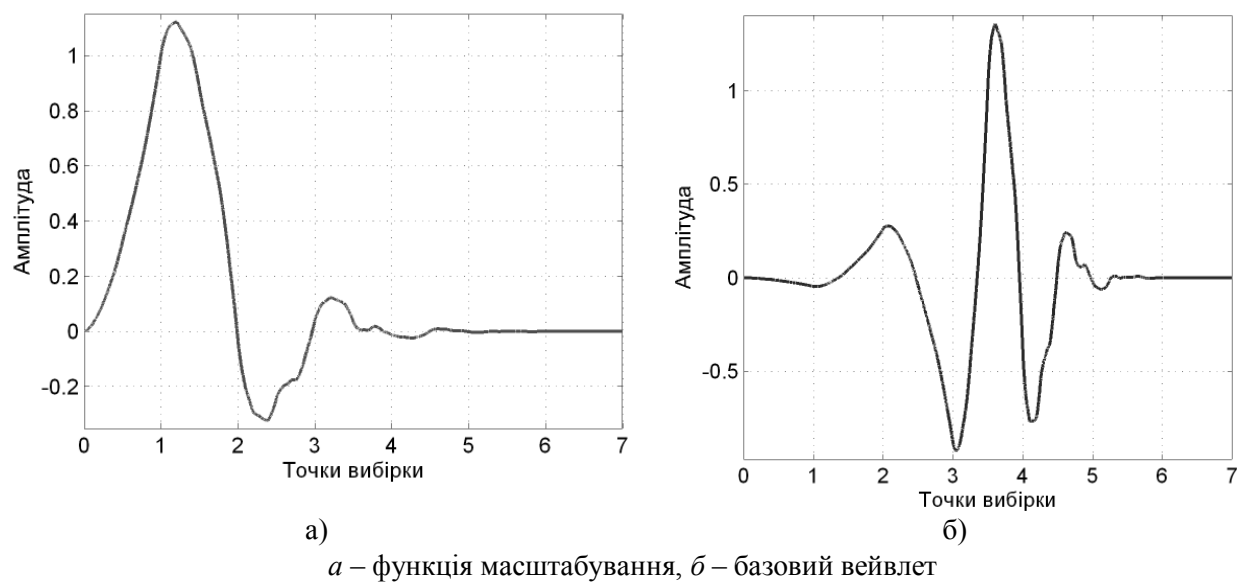


Рисунок 2 – Вейвлет Добеши 4

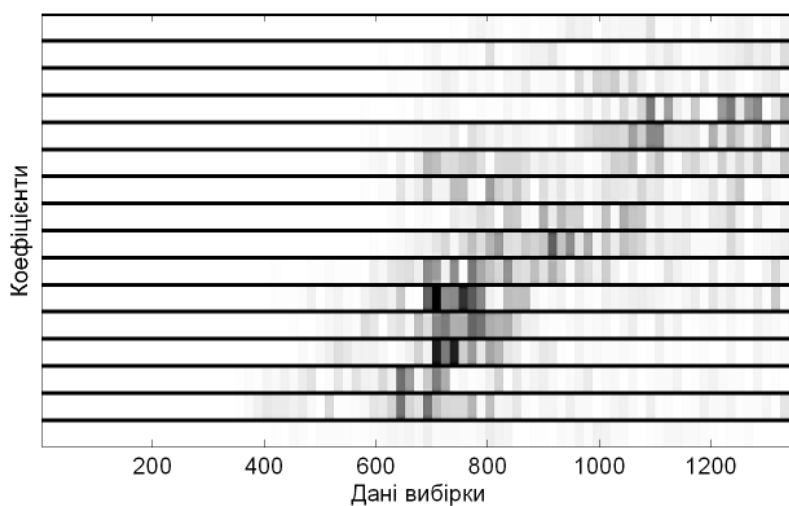


Рисунок 3 – Коефіцієнти вейвлет аналізу оригінального ультразвукового сигналу

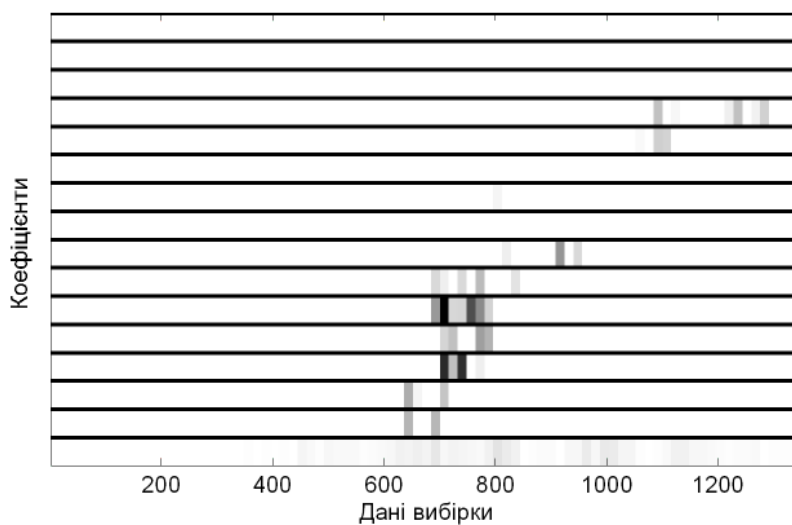


Рисунок 4 – Коефіцієнти вейвлет аналізу ультразвукового сигналу після застосування техніки зняття завад

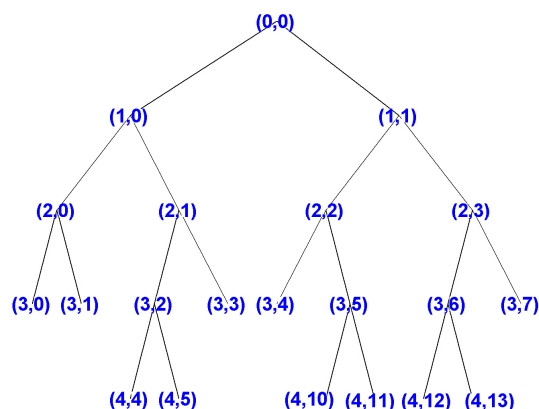


Рисунок 5 – Дерево декомпозиції сигналу технікою вейвлет пакетного аналізу

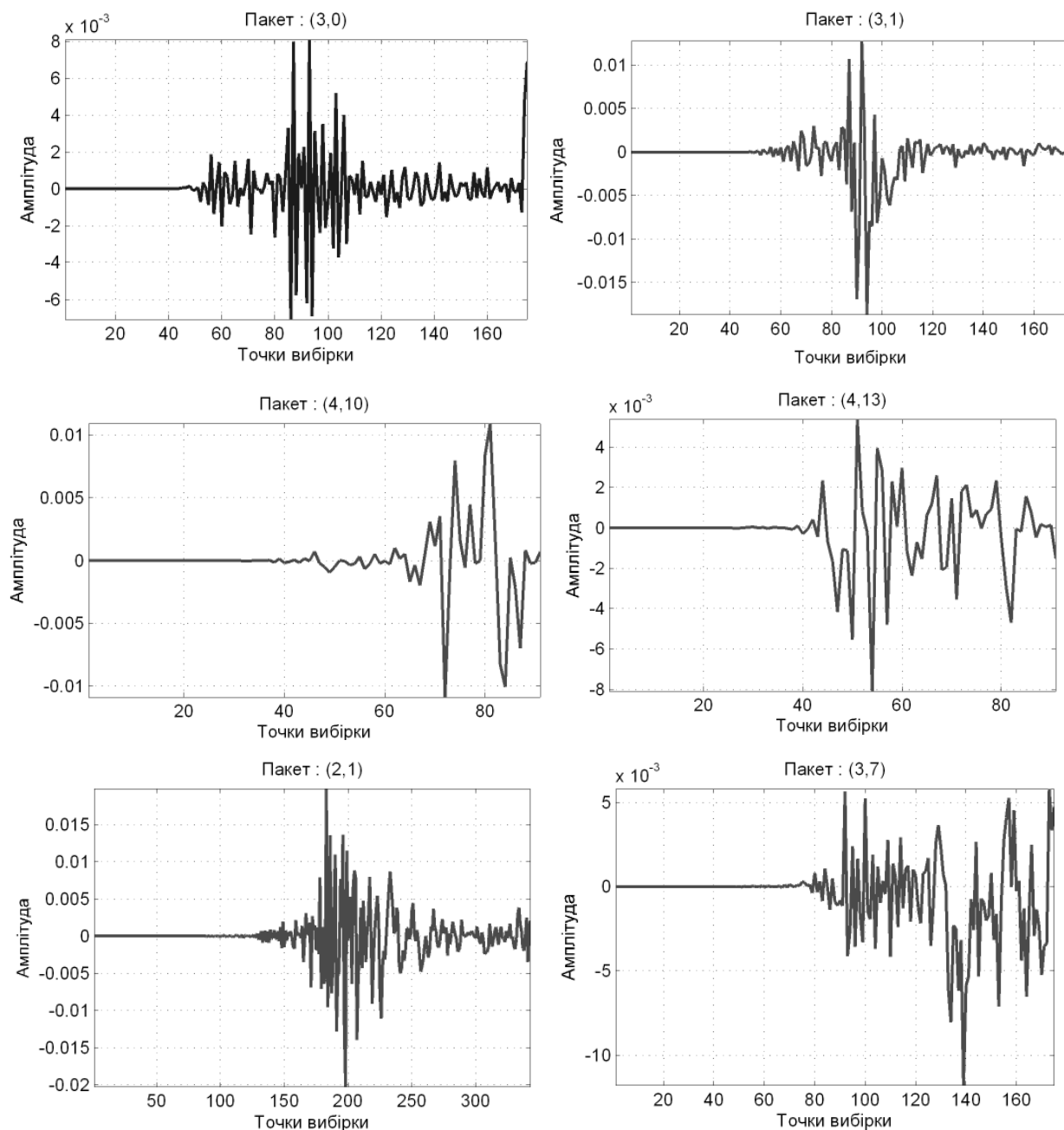


Рисунок 6 – Графіки ультразвукового сигналу після пакетної обробки

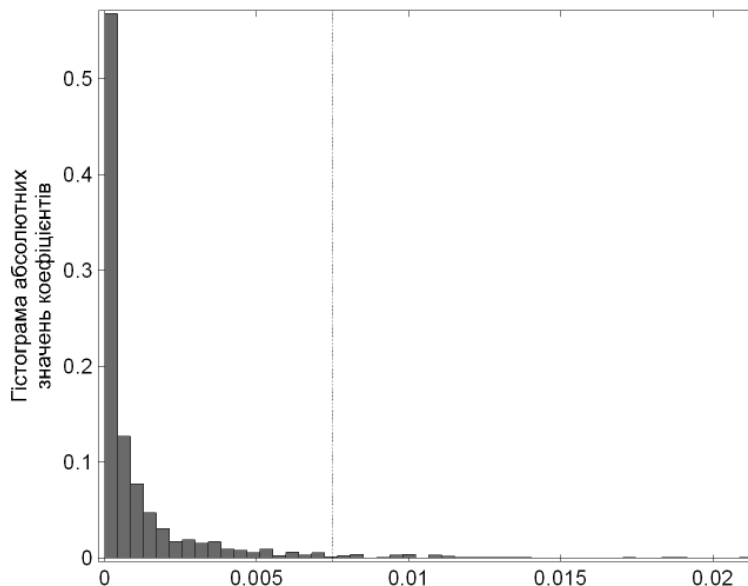


Рисунок 7 – Гістограма коефіцієнтів вейвлет аналізу сигналу

відносно малими швидкостями, необхідно в подальшому шукати у математичній моделі, що описує пружне поле багат шарового середовища.

Як можна побачити на рівні другого пакету вейвлет аналізу, низькочастотна складова зосереджена на середині часової шкали, що вказує на зосередженість в сигналі хвилі. За результатами цього аналізу можна стверджувати, що при генеруванні ультразвукового сигналу засобами моделювання скінченними елементами поширення ультразвукової хвилі в багат шаровому середовищі було створено одну хвилю, що поширюється із швидкістю поверхневої хвилі Релея.

Пакет 3,7 вказує на неінформативний сигнал, який необхідно відкинути на етапі аналізу ультразвукової хвилі. Опис деякими вейвлет коефіцієнтами частини неінформативного сигналу уможливило створення набору пакетів, що відповідатимуть за очищення від завад шуканої форми хвилі.

Гістограма коефіцієнтів вейвлет аналізу зображена на рис. 7.

Гістограма вказує на значну концентрацію енергії сигналу, що підтверджено результатами проведеного пакетного вейвлет аналізу.

### Висновки

Вейвлет аналіз дає змогу інтелектуалізувати сигнал ультразвукової хвилі шляхом поділу його на частини із різним розділенням в часовій та частотній області, що уможливило виокремлення вейвлет коефіцієнтів, що відповідають за опис ультразвукової хвилі та завад. Подальший аналіз дозволив визначити присутність ультразвукової хвилі із меншою енергією сигналу, що може бути ефективно застосовано до опису зміни поверхні металевієї пластини.

Робота виконана на кошти гранту Президента України GP/F27/0150.

### Література

- 1 Kuo I.Y. A novel method for the measurement of acoustic speed / I.Y. Kuo, B. Hete, K.K. Shung // J. Acoust. Soc. Am.- 1990.- Volume 88.- Issue 4.- p. 1679-1682.
- 2 Hsu D.K. Simultaneous ultrasonic velocity and sample sickness measurement and application in composites / D. K. Hsu, M. S. Hughes // J. Acoust. Soc. Am.- 1992.- Volume 92.- Issue 2.- p. 669-675.
- 3 Grossmann A. Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape / Grossmann A., Morlet J. // SIAM J. Math.- 1984.- 15.- p. 723-736.
- 4 Mallat S. Multiresolution representations and wavelets, Ph.D. Thesis, University of Pennsylvania, Philadelphia.- 1988.
- 5 Meyer Y. Wavelets and Operators: Vol. 37. (Cambridge Studies in Advanced Mathematics). / Meyer Y. - Cambridge University Press. - 1995. - 244 p. - ISBN 978-0521458696.
- 6 Daubechies I. Orthonormal bases of compactly supported wavelets / Daubechies I. // Comm. Pure Appl. Math.-1988.- 41.- p. 909-996.
- 7 Radunovic D.P. Wavelets: From Math to Practice. / D. P. Radunovic.- Springer.- 2009.- 160 p.- ISBN 978-3642006135.
- 8 Coifman R. R. Entropy-based algorithms for best basis selection / Coifman, R.R., M.V Wickerhauser // IEEE Trans. on Inf. Theory.- 1992.- vol. 38.- 2.- p. 713-718.
- 9 Addison N. The Illustrated Wavelet Transform Handbook / N. Addison.- Taylor & Francis.- 2002.- 400 p.- ISBN 978-0750306928.

Стаття поступила в редакційну колегію  
09.07.10

Рекомендована до друку професором  
**В. М. Юрчишиним**